أول إصدارات نـــــادي التـــرجمة

ملتقـى الفيزيائييـن العـرب

إصـــــدارات نـــــادي الترجمــــــــة



النظرية النسبية الخاصة

من محاضرات فينمان

ترجمة:

عبير عبد اللـــــه	عائشة نوري نبيل
محمد الشـــــوا	رهام علي كتبي
ليلى سلمان محمد	روان

احمد ابراهيم محمد على

المراجعة و التنسيق:

دوارة عبد الرحمن

توثيـــــــــــــــــق

عنوان الكتاب	النظرية النسبية الخاصة
المصدر	www.feynmanlectures.info
الترجمة	فريق ملتقى الفيزيائيين العرب
المراجعة والتنسيق	دوارة عبد الرحمن
المؤلف	محاضرات فينمان
عدد الصفحات	29 صفحة
الفئة	المقالات

مقدمة:

لأكثر من 200 سنة، أعتُقِد بأن معادلات الحركة لنيوتن تصف الطبيعة بشكل صحيح، وعند اكتشاف الخطأ في هذه المعادلات لأول مرة، كان اينشتاين هو الذي اكتشف الخطأ وصححه وذلك في عام 1905 من خلال نظريته النسبية الخاصة.

تصحيح قانون نيوتن الثاني :

يعرف قانون نيوتن الثاني بالمعادلة التالية:

$$F = \frac{d(mv)}{dt},$$

والذي حَدد ضمنياً أن m قيمة ثابتة، وأن كتلة الجسم تتزايد مع السرعة. وقد صحح آينشتاين الخطأ في العلاقة معطيا الصياغة التالية :

$$m = \frac{m_\circ}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \rightarrow \quad 1$$

حيث "الكتلة السكونية" m_0 تمثّل كتلة جسم لا يتحرك و c سرعة الضوء، والتي تساوي

3×10^5 km.sec^{-1} أي حوالي 186.000 mi.sec^{-1}.

من الصيغة نفسها نجد انه من السهل رؤية أن تزايد الكتلة ضئيل جدا في الأحداث الاعتيادية. إذا كانت السرعة كبيرة بكبر سرعة القمر الصناعي، الذي يدور حول الأرض بسرعة مقدارها 5 ميل/ثانية، يكونً:

$$\frac{v}{c} = 5/186,000$$

بوضع هذه القيمة في الصيغة نجد أن تصحيح الكتلة سيكون جزء من 2 إلى 3 بليون, وهي بالتالي قيمة مستحيلة .

في الواقع، إن تصحيح الصيغة مبرهن بإسهاب من خلال رصد (مراقبة) أنواع عديدة من الجسيمات، التي تتحرك بسرعات محددة بمستوى سرعة الضوء تقريباً. ولكن عادةً بسبب صِغر التأثير، فإنه على ما يبدو، أنها أُكتُشِفت نظرياً قبل اكتشافها عملياً، وعلى نحوٍ تجريبي عند سرعة عالية بشكلٍ كاف، فإن التأثير سيكون كبير، لكن تلك الطريقة لم تكتشف. لذلك من المهم معرفة دقة تعديل القانون المتضمن (في أول الوقت عند اكتشافه) المُرافق للضوء بتوحيد التجربة والاستنتاجات الفيزيائية.

أعِدّت المقالات الخاصة بالاكتشاف عن طريق عدد من الأشخاص، لكن كانت آخر نتائج الأعمال هي ما اكتشفه آينشتاين.

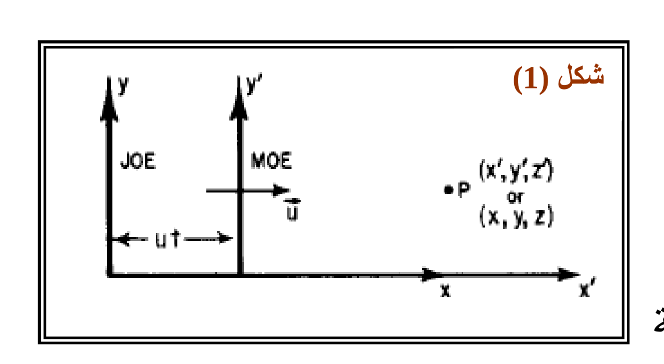
في الحقيقة هناك نظريتان لأينشتاين في النسبية. النظرية النسبية الخاصة، التي اكتشفت سنة 1905 والنظرية النسبية العامة التي اكتشفت سنة 1915 . وهذه النظرية تعالج في نطاق النسبية الخاصة في حالة قوانين الجاذبية، وفي هذا الكتاب سنسلط الضوء على النظرية النسبية الخاصة .

نيوتن حدد مبدأ النسبية لأول مرة، في إحدى نتائج قوانين الحركة: **"إن تحركات الأجسام المحصورة في الفراغ المُعطى هي نفسها بين بعضها، سواء كان الفراغ في السكون أو الحركة المستقيمة المنتظمة "** ، **كمثال:** إذا انجرفت سفينة فضائية للأمام بسرعة منتظمة فإن كل التجارب المنجزة والظواهر في السفينة الفضائية ستظهر نفسها وكأن السفينة لا تتحرك طبعا بشرط، أن لا تظهر خارج النطاق. ذلك هو معنى مبدأ النسبية. وهذه فكرة مبسّطة، والسؤال الوحيد هنا هل صحيح انه ستكون القوانين الفيزيائية نفسها عند انجاز كل التجارب في نظام متحرك كما هي في حالة النظام في وضع ساكن.

ولكن هل ستبقى نفسها فيما لو كان النظام ساكنا.

دعنا أولا نتحقق هل ستبقى قوانين نيوتن كما هي في نظام الإحداثيات المتحرك بسرعة ثابتة.

لنفترض أن لدينا شخصان أحدهما ليكن (



Moe) يتحرك في الاتجاه السيني (x) بسرعة

منتظمة (u) و يقيس موقع نقطة محددة P كما في

الشكل (1) و أنه يعين الإحداثية x لتلك النقطة بالنسبة

لنظامه هو بأنها x′ .

و أن الآخر و هو (Joe) في حالة سكون ، ويقيس موقع نفس النقطة P و يعين

الإحداثية x لتلك النقطة بالنسبة لنظامه وليكن x

إن العلاقة بين الإحداثيات في هذين النظامين واضحة من الرسم .

بعد زمن (t) يكون نظام (Moe) قد تحرك مسافة قدرها (ut) ،

وإذا كان النظامان متزامنان فإن :

$$
\begin{aligned}
x' &= x - ut, \\
y' &= y, \\
z' &= z, \\
t' &= t.
\end{aligned}
\qquad \text{———————} \qquad (2)
$$

يظهر الرسم نظامين إحداثيين أحدهما في حالة حركة منتظمة باتجاه المحور السيني

بالنسبة للآخروإذا عوضنا هذه القيم للإحداثيات في قوانين نيوتن



نجد أن هذه القوانين لا تتأثر سواء كان الجسم ساكنا أو متحركا .

و لذلك يكون مستحيلا أن نستنتج أن النظام ساكن أو متحرك بإجراء التجارب الميكانيكية .

لقد استخدم مبدأ النسبية في الميكانيكا منذ وقت طويل ،و طبقه العديد من العلماء ،على وجه الخصوص طبقه العالم هايجنز (Huygens) ليحصل على قوانين التصادم المرن في كرات البلياردو.

وفي القرن الماضي زاد الاهتمام بها كنتيجة للأبحاث في ظواهر الكهربية ، و المغناطيسية ، و الضوء .. و أجرى عدد من العلماء سلسلة طويلة من الدراسات المتعمقة لهذه الظواهر ، و توجت جهودهم بمعادلات ماكسويل

(Maxwell) في الكهرومغناطيسية التي تعبر عن الكهربية ،والمغناطيسية و الضوء في صورة معادلات عامة واحدة .

على كل بدا و كأن معادلات ماكسويل لا ينطبق عليها مبدأ النسبية ،أي أنه إذا عوضنا في معادلات ماكسويل بالقيم التي حصلنا عليها من المعادلة (2) فإن صورتها لا تبقى كما هي ،لذلك فإن سفينة الفضاء المتحركة ستختلف فيها الظواهر الكهربية ، والمغنطيسية ،و الضوئية عن سفينة الفضاء الساكنة ،

لذا فإنه يمكن استخدام هذه الظواهر المحسوسة المرئية لنقدر سرعة السفينة الفضائية ،و على وجه الخصوص يمكن الحصول على السرعة المطلقة للسفينة الفضائية بإجراء الحسابات المناسبة الكهربية أو الضوئية ،

من نتائج معادلات ماكسويل: أنه إذا كان لدينا اضطراب في المجال بحيث يتولد الضوء فإن هذه الموجات الكهرومغناطيسية ستنتشر في جميع الاتجاهات بالتساوي بنفس السرعة (C) حيث : ميل/ثانية C=186000 أي 300000km/s

نتيجة أخرى لمعادلات ماكسويل:

إذا كان منبع الموجات متحركا فإن الضوء المنبعث سينتشر في الفراغ بنفس السرعة C ، وهذا يشابه موجات الصوت حيث أن سرعة موجات الصوت أيضا لا تعتمد على حركة المصدر،

و حيث أن سرعة انتشار الضوء لا تعتمد على حركة المنبع فهذا يعطينا هذه المسألة الممتعة.

لنفرض أننا تركب سيارة تنطلق بسرعة u ،و أن الضوء ينبعث من مؤخرة السيارة بسرعة C

بمفاضلة المعادلات (2) ينتج :

$$d'x / dt = dx / dt - u$$

و هذا يعني أنه طبقا لتحويلات جاليليو فإن السرعة الظاهرية للضوء ،كما نقيسها من السيارة لن تكون C بل تصبح: **(C - u)**

و على سبيل المثال إذا كانت السيارة منطلقة بسرعة 100،00 ميل / ثانية و الضوء ينبعث من مؤخرة السيارة بسرعة (ميل/ثانية C=186000)

فإن سرعة مرور الضوء بالسيارة =86،000 ميل /ثانية

على أية حال يمكن بقياس سرعة مرور الضوء بالسيارة أن نحسب سرعة السيارة (على افتراض أن تحويلات جاليليو تنطبق على الضوء)

و قد أجريت العديد من التجارب مبنية على هذه الفكرة العامة وذلك لحساب سرعة الأرض ،و لكنها فشلت و لم نحصل منها على أي قيم مطلقا.. و سوف نتعرض لهذه التجارب بالتفصيل لنرى على وجه الدقة ما الإجراءات

التي اتبعت ، و ما الأخطاء التي ارتكبت إذ أنه لا بد من خطأ ما في المعادلات الفيزيائية .. **ترى ما هو ذلك الخطأ؟**

تحويلا ت لورنتز (Lorentz):

عندما ظهر فشل النظريات الفيزيائية في الحالة السابقة بالنسبة للضوء، كان التفسير الأول أن هناك خطأ في معادلات ماكسويل في (الإلكتروديناميكا) التي كان يعود تاريخ استنتاجها إلى 20 عاما فقط في تلك الفترة، و بدا كما لو أن هذه المعادلات خاطئة،و لذلك لا بد من تعديلها بحيث لا تتعارض تحويلات جاليليو مع مبدأ النسبية.

و بناء على ذلك أضيفت حدود جديدة للمعادلات قادت للتنبؤ بظاهرة كهربية جديدة لم تكن موجودة مطلقا أثناء التجربة العملية، و لهذا كان لا بد من التخلي عن هذه الطريقة ..

و بالتدريج أصبح من الظاهر أن معادلات ماكسويل في الالكتروديناميكا صحيحة ، و أن الخطأ يكمن في أمر آخر.

في نفس الوقت كان العالم لورنتز (H .A. Lorentz) قد لاحظ شيئا لافتا للنظر و مثيرا للفضول عندما عوض بهذه القيم في معادلات ماكسويل:

$$
\begin{aligned}
x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\
y' &= y, \\
z' &= z, \\
t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},
\end{aligned}
\qquad \text{———————— (03)}
$$

و هذا يعني أن معادلات ماكسويل تبقى نفسها عندما نطبق هذه التحويلات..

عرفت هذه المعادلات (3) بمعادلات لورنتز .

و افترض أينشتين(Einstein) مستفيدا من اقتراح(Poincare) أنه حتى تبقى القوانين الفيزيائية كما هي في تحويلات لورنتز أن ما يجب أن يتغير هو قوانين الميكانيكا و ليس قوانين الإلكتروديناميكا.

كيف سنغير قوانين نيوتن بحيث لا تتغير في تحويلات لورنتز؟ إذا أردنا أن نحقق هذا الهدف فإنه يجب أن تعاد صياغة قوانين نيوتن بحيث أن الشروط التي فرضناها تتحقق، و بدا و كأن المتطلب الوحيد هو أن الكتلة m في معادلات نيوتن يجب أن تستبدل بالصيغة المذكورة في المعادلة (1) ، و عند إجراء هذا التعديل سوف تتوافق قوانين نيوتن وقوانين الإلكتروديناميكا، و عندها لو استخدمنا تحويلات لورنتز لمقارنة قياسات

(Moe) مع قياسات (Joe) فلن يكون باستطاعتنا أن نكتشف أيهما متحرك لأن صيغ المعادلات ستصبح نفسها في كلا نظامي الإحداثيات،

إنه من الممتع حقا أن نناقش ما الذي يعنيه استبدال التحويلات القديمة للإحداثيات والزمن بالتحويلات الجديدة لأن التحويلات القديمة (تحويلات جاليليو) تبدو بديهية أما الجديدة (تحويلات لورنتز) فتبدو غريبة,,و نحب أن نعرف أيها منطقية و ممكنة عمليا ، وأيها تكون الصحيحة.



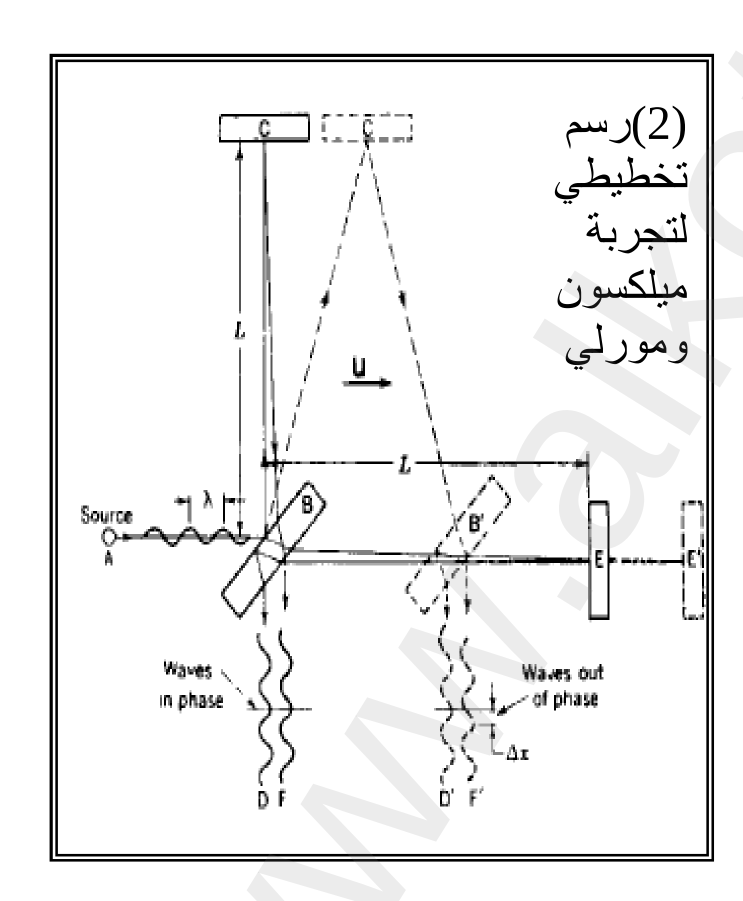
و حتى نتوصل إلى ذلك لا بد أن نحلل أفكارنا عن الفراغ و الزمن من أجل أن نفهم هذه التحويلات . و سوف نناقش هذه الأفكار و التطبيقات على الميكانيكا , و سنتناول ذلك بشيء من التفصيل حتى نصل إلى نتائج مقنعة عندما تتطابق النتائج النظرية مع التجارب..

تجربة (مايكلسون و مورلي):

كما نوهنا أعلاه تستمر المحاولات لتحديد السرعة المطلقة للأرض خلال الوسط الافتراضي"الأثير" الذي يفترض أنه يعم كل الفضاء..

و أشهر هذه التجارب هي التجربة التي قام بها ميكلسون و مورلي في العام1887 م وبعد إجرائها بـ 18عاما تمكن أينشتين من تفسير نتائجها السلبية.

أجريت التجربة (ميكلسون-مورلي) بجهاز كما يبين في الشكل المجاور الشكل (2)



(2)رسم تخطيطي لتجربة ميلكسون ومورلي

يتكون هذا الجهاز أساسا من منبع ضوئي Aو لوح زجاجي مطلي جزئيا بالفضةB و مرآتان مستويتان E،C كلها مثبتة على قاعدة

صلبة. وتكون المرآتان على مسافتين متساويتين من اللوح B ،أما اللوح B فلأنه نصف شفاف فيقسم الشعاع الساقط إلى حزمتين ، و الحزمتان الناتجتان تقسّم الصفيحة B الشعاع الضوئي القادم, فيواصل الشعاعان الناتجان طريقهما باتجاهين عموديين تبادليا للمرآتين، حيث ينعكسان ويعودان إلى B. يتحد الشعاعين بوصولهما إلى B نفرض أن الشعاعين, F , D. إذا كان الزمن الذي يأخذه الضوء في الذهاب والعودة من B إلى E نفسه في الذهاب والعودة من B إلى C, الشعاعين المنبثقين D, F سيكونان في نفس الطور وسيقويان بعضهما, لكن إذا اختلف الزمنين بشكل بسيط, فسيختلف طورهما وسينتج تداخل. إذا كان الجهاز "ساكنا " في الأثير(الوسط الذي ينتقل فيه الضوء) سيتساوى الزمنان بدق, لكن بتحركه لليمين بسرعة u،سيكون هنالك اختلاف في الزمنين. دعونا نرى لماذا؟

أولا،علينا حساب الزمن المطلوب لذهاب الضوء وعودته من B إلى E. لنقل أن الزمن من الصفيحة B للمرآة E سيكون t1, وزمن العودة t2. الآن, بينما الضوء في طريقه من B للمرآة, يتحرك الجهاز بمسافة ut_1, لذا يجب أن يتحرك الضوء مسافة $L + ut_1$, بسرعة c.

نستطيع أيضا التعبير عن هذه المسافة كـ ct1, لذا لدينا:

$$ct1 = L + ut1 \qquad \text{or} \qquad t1 = L/(c-u)$$

(هذه النتيجة موضحة أيضا من وجهة نظر أخرى بأن سرعة الضوء بالنسبة للجهاز c – u, لذا نجد أن الزمن يساوي النسبة مابين الطول L إلى (c-u

وبنفس الطريقة نحسب t2. خلال هذا الزمن تتقدم الصفيحة B مسافة ut2،لذا المسافة التي يعود بها الضوء L – ut2. وبذا يكون لدينا:

ct2 = L – ut2 ,   or   t2 = L / (c + u)

وبذا يكون الزمن الكلي:

t1 + t2 = 2L c / (c2 – u2)

يمكننا كتابته كالآتي لتلاؤم العلاقة السابقة:

$$t_1 + t_2 = \frac{2L/c}{1 - u^2/c^2} \qquad 4$$

حساباتنا التالية ستكون للزمن t3 وهو الزمن اللازم لذهاب الضوء من B للمرآة C. كما في السابق, فإنه خلال الزمن t3 فإن المرآة C تتحرك لليمين مسافة ut3 للموضع 'C ; في نفس الزمن, يسير الضوء مسافة ct3 خلال وتر المثلث 'BC. حيث يكون لدينا:

(ct3)2 = L2 + (ut3)2

أو

$$L^2 = c^2\, t_3^2 - u^2\, t_3^2 = (c^2 - u^2) t_3^2$$

نحصل على

$$t_3 = L \,/\, \sqrt{c^2 - u^2}\,.$$

المسافة نفسها التي يقطعها في رحلة عودته من 'C, كما نرى من تماثل الشكل; لذا نجد أن زمن العودة نفسه أيضا, والزمن الكلي 2t3. بتعديلات بسيطة على الصيغة نستطيع كتابتها على الصورة:

$$2t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2\,L\,/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \qquad 5$$

والآن يمكننا بين الزمنين اللازمين لشعاعي الضوء. في العلاقتين 5 ,4 نجد أن بسوط الكسور متماثلة, وتمثل الزمن اللازم أخذه إذا كان الجهاز في حالة سكون. في المقامات, الطرف u2/c2 سيكون صغير, ماعدا u تقارن بـ c من حيث الكِبَر. تشير المقامات إلى التعديل (التصحيح) في الزمنين

بسبب حركة الجهاز. ونلاحظ أن ليست نفسها – حيث أن زمن الذهاب لـ C والعودة اقل بقليل من زمن الذهاب لـ E والعودة, برغم أن المرآتين متساويتي الأبعاد عن B, ويجب علينا قياس ذلك الفرق بدقة.

ظهرت نقطة تقنية قاصرة (ثانوية) – افترض أن الطولين L غير متساويين بدقة؟ حقيقةً, لن نستطيع جعلهما متساويين تماما. وفي تلك الحالة أدرنا الجهاز 90 درجة ببساطة, لذا BC كانت في خط الحركة و BE عمودية على الحركة.

عند القيام بالتجربة ، قام مايكلسون ومورلي بمعايرة الجهاز بحيث يصبح المستقيم BE موازٍ تقريبا لحركة الأرض في مدارها (في أوقات محددة من الليل والنهار) هذه السرعة المدارية تساوي تقريبا 18 ميل في الثانية ، وأي انعطاف للأثير يجب على الأقل أن يكون بنفس هذا المقدار في وقت ما من النهار أو الليل وفي وقت محدد من السنة . كان الجهاز دقيقا جدا ليقيس تأثرا كهذا ، لكن لم يوجد هناك أي فرق في الزمن ، فسرعة الأرض خلال الأثير لا يمكن حسابها من خلال التجربة ، فنتائج التجربة كانت لا شيء .

وقد كانت نتائج التجربة محيرة ومزعجة . الفكرة الأولى المثمرة لإيجاد مخرج من هذا المأزق أتت من "**لورنتز**". لقد اقترح أن الأجسام المادية تتقلص عندما تتحرك ، وهذا التقلص يحدث فقط في اتجاه



الحركة ، وأيضا ، أن الجسم الذي طوله L_0 عند السكون ، فإن طوله الجديد L (L – الموازي) عندما يتحرك بسرعة u موازية لطوله يعطى بالعلاقة:

$$L_{||} = L_0 \sqrt{1 - u^2/c^2}$$

(15.6)

عندما يتم هذا التغير على جهاز مايكلسون - مورلي للتداخل ، فإن البعد بين B و C لا يتغير لكن المسافة من b إلى e تقل لتصبح $L\sqrt{1 - u^2/c^2}$ عندها فالمعادلة (15.6) لا تتغير لكن L في المعادلة (15.4) يجب أن تتغير بناء على المعادلة (15.6) عندها نحصل على :

$$t_1 + t_2 = \frac{(2L/c)\sqrt{1-u^2/c^2}}{1-u^2/c^2} = \frac{2L/c}{\sqrt{1-u^2/c^2}}$$

(15.7)

بمقارنة هذه النتيجة مع المعادلة (15.5) نرى أن t1 + t2=2t3 لذا لو كان الجهاز يتقلص بالطريقة التي وجدناها، يمكننا أن نفهم لماذا لم تعطي تجربة مايكلسون – مورلي أية نتائج . على الرغم من أن فرضية التقلص نجحت في نفي نتائج التجربة الخاطئة ، إلا أنها كانت تتعرض لانتقادات



بأنها مصطنعة و وضعت لتبسيط صعوبة المسألة . على أية حال ففي تجارب أخرى لاستكشاف رياح الأثير ظهرت نفس الصعوبات ، حتى بدأت تتسبب بإحباط للعلماء بحيث تبرز ظواهر جديدة تلغي السابقة لها والتي اعتقدوا أنها ستتيح لهم إيجاد قيمة u .

أشار "**بوينكاري**" أنه لا يمكن اكتشاف رياح الأثير بأي تجربة لأنه ليس بالإمكان تعيين السرعة المطلقة .

تحور الزمن :

في إطار تحديد إذا ما كانت فكرة التقلص تتناغم مع الحقائق في التجارب الأخرى تبين أن الزمن قابل للتحور في الطريقة المنصوص عليها في المعادلة الرابعة من المجموعة (15.3) هذا بسبب أن الزمن t3 المحسوب للرحلة من B إلى C ثم العودة مرة أخرى ، يختلف إذا قيس من رائد الفضاء الذي يقوم بالتجربة في سفينة فضائية متحركة في الفضاء وإذا قاسه مراقب ثابت يراقب سفينة الفضاء . بالنسبة للرجل الذي في السفينة الزمن ببساطة 2L/c ، لكن للمراقب الآخر هي $(2L/c)/\sqrt{1-u^2/c^2}$ المعادلة (15.5).

بطريقة أخرى عندما يرى المراقب رائد الفضاء يشعل سيجارا ، فجميع حركاته تبدو أبطأ من المعتاد ، بينما بالنسبة للرجل في السفينة فإن كل شيء يحدث بالسرعة المعتادة . إذا ليس الطول فقط يتقلص ، بل حتى أدوات قياس الزمن (الساعات مثلا) يجب أن تبدو أبطأ ظاهريا . فعندما تسجل الساعة في سفينة الفضاء مرور ثانية واحدة كما يراها رائد الفضاء تمثل $1/\sqrt{1-u^2/c^2}$ بالنسبة للمراقب الثابت هذا التباطؤ في الساعات في الأنظمة المتحركة هو ظاهرة غريبة جدا ، تستحق الشرح . لفهم هذا الأمر علينا أن نشاهد آلية حركة الساعة ونرى ماذا يحدث عندما تتحرك .

إن ما يجب علينا أخذ ساعة (عداد لقياس الوقت) ذات نوع بسيط جدا. والساعة التي اخترناها كانت لحدٍ ما بسيطة جداً, لكنها ستعمل بقاعدة: قضيب (عصا مترية) بمرآه في نهايتيه، يواصل الضوء انطلاقه لأعلى وأسفل، محدثاً صوت (طرقة) كل وقت يصل فيه لأسفل, كصوت الساعة القياسية. جهزنا منها ساعتين، لهما تماما نفس الطول, وزامنّاهما بجعلهما يبدآن في نفس

شكل 15-3: (a) "الساعة الضوئية" عند السكون في النظام 's. (b): نفس الساعة تتحرك خلال النظام s. (c): توضيح المسار القطري المأخوذ بواسطة الشعاع الضوئي في الحركة "ساعة ضوئية"

الوقت: وبعد ذلك أصبحا متوافقتان، لأن لهما نفس الطول، والضوء دائما له سرعة واحدة c. أعطينا شخص إحدى تلك الساعتين ليأخذها معه

في إحدى رحلاته بالسفينة, وقد أسند القضيب عموديا على اتجاه حركة السفينة: وبذا لن يتغير طول القضيب. **كيف يتسنى لنا معرفة ما إذا كانت الأطول المتعامدة لن تتغير؟**

وافق الرجل على وضع علامات على العصا المترية y كلما تجاوزت بعضها البعض. بالمماثلة, العلامتين يجب أن تكون نفسها على الإحداثيات y, y', وبطريقةٍ أخرى, عند مقارنة نتائجهما المتحصّل عليها, فإن إحدى العلامتين ستكون أعلى أو أسفل الأخرى, وبذا نستطيع معرفة من كان المتحرك فعلياً.

دعنا الآن نرى ما الذي حدث للساعة المتحركة. قبل أن يأخذها الرجل معه, كان متفق على أنه من الجيد أخذ ساعة قياسية, وعندما يذهب طويلا في رحلته بالسفينة الفضائية لن يجد فيها شيئاً مميزاً. إذا أخذها سيعرف أنه يتحرك – إذا لم يغير شيء نهائياً بسبب الحركة, سيستطيع القول بأنه كان يتحرك. لكن مبدأ النسبية يقول أن ذلك مستحيل في نظام الحركة المنتظمة, لذا لاشيء سيتحرك. من ناحية أخرى, عندما ينظر الملاحظ الخارجي



لمرور الساعة, فإنه يرى الضوء, عند تحركه من مرآة لأخرى, في الحقيقة سيأخذ مسار بشكل متعرج, بينما القضيب يتحرك بانحراف إلى الجانب كل فترة.

لدينا الآن تحليل مثل حركة بخط متعرج بالارتباط مع تجربة مايكلسون-مورلي.

إذا تحرك القضيب في وقت معطى للأمام مسافة تتناسب مع u (شكل 15-3), فإن المسافة التي يسير بها الضوء في نفس الوقت تتناسب مع c, إذاً المسافة العمودية تناسب مع $\sqrt{c^2 - u^2}$ **.**

ذلك يأخذ وقت أطول للضوء المنتقل من نهاية لنهاية في الساعة المتحركة من الساعة الثابتة. لذلك الوقت الظاهر بين التكات أطول للساعة المتحركة, وعلى نفس النسق كما هو موضّح على وتر المثلث (ذلك مصدر علاقات الجذر التربيعي في معادلاتنا). يتضح لنا أيضاً من الشكل أنه كلما زادت u, كلما بطئت سرعة الساعة المتحركة. إذا كانت النظرية النسبية صحيحة, فإنه ليس فقط هذا النوع من الساعات سيتحرك ببطء بل أي ساعة أخرى, مهما عملنا على أي مبدأ, ستبدو كذلك بالتحرك ببطء, وبنفس التناسب – نستطيع أيضا قول ذلك بدون تحليل. **لماذا يكون ذلك صحيحا؟**

للإجابة على السؤال أعلاه, افترض أن يكون لدينا ساعتين مصنوعتين بحيث تتماثل تماما مع العجلات والتروس, أو ربما تعتمد على الانحلال الإشعاعي, أو شيء آخر. ثم نضبط هذه الساعات بحيث تتحرك جميعها بتزامن دقيق مع ساعتنا الأولى. عند ذهاب الضوء لأعلى وعودته وإعلان وصوله بطرقة , أيضا النماذج الجديدة تكمل طريقة دورتها, ويعلن التطابق بوميض مضاعف متوافق, أو رنين, أو إشارة أخرى.

أخذت إحدى هذه الساعات في سفينة فضائية, مع النوع الأول. يمكن أن تتحرك هذه الساعة ببطء, لكنها ستواصل المحافظة على نفس الوقت كنسختها المستقرة, وذلك لا يتوافق مع الساعات المتحركة الأخرى. إذا كان ذلك لا بد له من الحصول, فإن الرجل يستطيع استخدام (mismatch) بين ساعتيه لتحديد سرعة هذه السفينة, والتي علينا أن نفترض أنها مستحيلة.

لن نحتاج معرفة أي شيء عن آلية الساعة الجديدة وذلك ممكن أن يسبب التأثير – نعرف ببساطة أنه أياً كان السبب, سوف تبدو أنها تتحرك ببطء, فقط مثل الأولى.

الآن, إذا تحركت كل الساعات المتحركة ببطء, إذا ليس هناك أي طريقة لقياس الوقت تعطينا أي شيء لكن معدل بطيء, يجب علينا فقط أن



نقول, في الإحساس اليقيني, أن الوقت نفسه يبدو بطيئاً في السفينة الفضائية.

كل الظواهر هنا – معدل نبض الرجل, عمليات تفكيره, الوقت الذي يأخذه لإشعال سيجاره, كم من الوقت الذي يأخذه في نموه وازدياد عمره – كل هذه الأشياء يجب أن تتناقص بنفس النسبة, لأنه لن يستطيع القول بأنه يتحرك. بعض الأحيان يقول البيولوجيين والأطباء لن يكون الزمن المحدد طويلا لتطور السرطان في السفينة الفضائية, لكن من وجهة نظر الفيزياء الحديثة أنه تقريبا محدود بطريقة أخرى, يمكن استخدام معدل تطور السرطان لتحديد سرعة السفينة!

كمثال مثير للاهتمام لإبطاء الوقت مع الحركة هو من تقديم مو ميزون (ميونات) وهي الجزيئات التي تتحلل من تلقاء نفسها بعد عمر متوسط من 2.2 × 10-6 ث. تأتي إلى الأرض على شكل أشعة كونية، ويمكن إنتاجها اصطناعياً في المعامل. بعضها تتحلل في الجو ولكن الباقي يتحلل فقط بعدما تصادم قطعة من المادة وتتوقف. يتضح من خلال عمر الميون أنه لا يمكنها السفر أكثر من 600 متر حتى لو كانت بسرعة الضوء. وبالرغم من أنها تُصنع في أعلى الغلاف الجوي أعلى من الغلاف الجوي بحوالي 10 كيلومترات، فهي في الواقع توجد هنا في المختبرات على شكل أشعة



كونية.

كيف يمكن ذلك؟ الجواب هو أن الميونات المختلفة تتحرك بسرعات مختلفة بعضها قريب جداً من سرعة الضوء. بينما من وجهة نظرهم فهي تعيش لمدة تقدر بحوالي 2 جزء من الثانية، ومن وجهة نظرنا فإنها تعيش أطول بكثير لمدة تكفي ليصلوا إلى الأرض. المعامل زيادة الزمن أعطي كالتالي: 1-u2\c2 1\ تم قياس متوسط عمر الميونات بدقة لميونات بسرعات مختلفة. والقيم تتوافق بقرب مع المعادلة.

نحن لا نعلم لماذا يتحلل الميزون أو ما هي آلية العمل، لكننا نعلم أن سلوكها يرضي مبدأ النسبية. وهذه هي منفعة مبدأ النسبية – فهي تسمح لنا بالتوقع حتى عن الأشياء التي لا نعلم عنها الكثير. على سبيل المثال، قبل أن تكون لنا أي فكرة عن تحلل الميزون لا يزال يمكننا التوقع وقتما تتحرك بسرعة الضوء، طول الزمن الواضح الذي يدوم هو (2.2 × 6-10)/ 1- 9 2 10/ 2 ث. وتوقعاتنا تقول أن هذا هو الشيء الجيد فيه.

انكماش لورنتز

الآن لنعود إلى تحول لورنتز (15.3) ونحاول الحصول على فهم أفضل للعلاقة بين (X ,y ,z ,t) و بين (1x ,1y ,1z ,1t) نظام التناسق الذي

سنرمز له بنظام الـ S و نظام الـ S1 أو نظامي جو و مو على التوالي لقد سبق ولاحظنا أن المعادلة الأولى مبنية على اقتراح لورنتز للانكماش مع اتجاه ـ x; كيف يمكننا إثبات أن الانكماش يأخذ مكاناً؟ في تجربة مايكلسون مورلي.

الآن نقدر أن مستعرض أرمينيا BC لا يمكن أن يغير الطول حسب مبدأ النسبية، لكن النتيجة الباطلة للتجربة تطلب أن الوقت يجب أن يكون متساو. لذا حتى تعطي التجربة نتيجة باطلة الذراع الطولي BE يجب أن تكون أقصر بالجذر التربيعي 1- 2u/ 2c

ماذا يعني هذا الانكماش من حيث القياسات التي تمت بواسطة جو و مو؟ لنفترض أن مو يتحرك بنظام الـ 1S بالاتجاه X وهو يقيس الإحداثي X-1 من نقطة ما بعصا المتر، يضع العصا X مرة ، إذاً هو يظن أن المسافة هي X متر. لكن من وجهة نظر جو في النظام S، لكن مو يستعمل مسكرة مقصرة، إذاً المسافة "الحقيقية" المقاسة هي X| 1- 2u / 2c متر. ثم إذا سافر النظام S| مسافة ut من النظام S ، الراصد S سيقول نفس النقطة المقاسة في إحداثياته هو على مسافة X = X| 1- 2u / 2c +

ut ,or

وهي أول معادلة من تحول لورنتز. $\frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$

التزامن

في طريق موازٍ بسبب اختلاف في جدول الوقت، الدينوميناتور، قُــدِّمت التعابير في المعادلة الرابعة من تحول لورنتز أكثر المصطلحات إثارةً للاهتمام في تلك المعادلة هو ux\c2 في البسط لأنه جديد وغير متوقع.

والآن ماذا يعني ذلك؟ إذا نظرنا إلى الوضع بتمعن نرى أن الأحداث الواقعة في مكانين منفصلين وفي الوقت نفسه كما يرى مو في النظام |S لا تحدث في الوقت نفسه للراصد جو إذا كان حصل حدث في النقطة X في الوقت t 0 وفي الحدث التالي في X2 وt 0 في الوقت نفسه.

نجد حالتان(t1' - t'2) تختلفان بالكمية أو المقدار, هذا النمط يدعى بـ **قصور التزامن المتفاوت** و لجعل الفكرة أوضح قليلاً دعنا نتأمل التجربة التالية , نتصور أن رجلاً ينتقل في حيز السفينة ولنسميه **(النظام s)** واضعاً في كلا نهاية السفينة ساعة , حريصا على أن يجعل كلا الساعتين في توقيت واحد**(متزامنتين)**

كيف تكون الساعتان متزامنتان ؟



هناك الكثير من الطرق , الطريقة الأولى أن تتضمن عمليات حسابية صغيرة أن نحدد بالضبط نقطة المنتصف بين الساعتين ثم من النقطة نرسل أشارة ضوئية في الاتجاهين بالسرعة نفسها وتصلان في نفس الوقت بشكل واضح

هذه اللحظة (الآنية) من وصول الإشارات نستطيع استخدامها لتزامن الساعتين أي حدوثهما في وقت واحد

ثم دعنا نتصورأن الرجل في النظام s' يزامن ساعتيه (اللتان على السفينة) بهذه الطريقة ذاتها.

دعنا نرى ما أذا كان المراقب في النظام S يوافق تزامن كلا الساعتين الرجل في النظام S' من حقه الاعتقاد بذلك , لأنه لم يعلم بأنها تتحرك

لكن الرجل في النظام S يعتقد أن السفينة تتحرك إلى أمام الساعة في المقدمة النهائية كانت تسبق الإشارة الضوئية

لذلك كان لابد للضوء أن يسبق الساعة الخلفية من منتصف الطريق على أية حال كان يتقدم ليلتقي بالإشارة الضوئية , لذا كانت هذه المسافة أقصر

بناء على تلك الإشارة تصل قبل الساعة الخلفية بالرغم من أن الرجل في في النظام s' أعتقد وصول الإشارة متزامنة

نتيجة لذلك عندما نرى أن الرجل في حيز السفينة يعتقد أن الوقت في المكانين لحظيين (آنيين)

القيم المتساوية بالنسبة't في النظام النظير يجب أن يقابل قيم مختلفة في النظام المناظر الأخر.

تم بحمد الله

هذا الكتاب؟

هو نتاج جهد مشترك بين أعضاء الترجمة في شبكة ملتقى الفيزيائيين العرب ، فالشكر الجزيل لهم على ما قدموه.

ويعد هذا أول كتاب تصدره هذه المجموعة الطيبة، هداها الله إلى خير ، فنسأل الله الهداية والتوفيق .

وأرجو أن تعذرونا على التأخير والتقصير

دوارة عبد الرحمن

انتظرونا في إصدارات جديدة